ВСЕРОССИЙСКАЯ КОНФЕРЕНЦИЯ ПО КОСМИЧЕСКИМ ЛУЧАМ

Филиал НИИЯФ им. Скобельцына МГУ, Дубна, 28.09 – 02.10.2020 Перспективы использования кремниевых фотоумножителей в детекторной камере черенковского гамма-телескопа

TAIGA-IACT

А.М. Красильщиков, Е.Е. Холупенко, Д.В. Бадмаев, А.А. Богданов, Ю.В.Тубольцев, Ю.В. Чичагов, А.С. Антонов, Д.О. Кулешов, Е.М. Хилькевич Email: <u>eug_khol@mail.ru</u>; Skype: eug_khol



Политехническая ул., 26, С.-Петербург, 194021 Телефон: (812) 297-2245 Факс: (812) 297-1017 post@mail.ioffe.ru http://www.ioffe.ru

Исследование выполнено при поддержке РНФ (грант 19-72-20045)

Аннотация

В работе представлены результаты моделирования полезного и шумового сигналов, ожидаемых в камере черенковского телескопа TAIGA-IACT с модернизированной камерой на SiPM. На основе этого моделирования определена пороговая энергия наблюдений телескопа TAIGA-IACT с модернизированной камерой. Показано, что использование камеры на SiPM OnSemi MicroFJ-60035 вместо камеры на вакуумных фотоумножителях XP1911 (текущая конфигурация) позволит примерно в два с половиной раза понизить пороговую энергию наблюдений космических гамма-квантов (с ≈ 1.5 до ≈ 0.6 ТэВ). Далее показано, что применение маски-фильтра с полосой пропускания 260 - 400 нм приводит к понижению уровня среднего полезного сигнала примерно в 3 раза, а уровня шумового сигнала, вызванного в камере телескопа фотонами фона ночного неба, примерно в 6 раз, что позволит увеличить рабочий цикл телескопа (вести наблюдения в лунные ночи и в сумерках) и дает возможность еще более понизить пороговую энергию наблюдений (до ~0.3 ТэВ при наблюдении гамма-источников с малыми зенитными углами в темные ночи). Также показано, что применение специального фильтра с полосой пропускания 260 – 300 нм, может позволить повысить эффективность определения типа первичной частицы в диапазоне энергий 25 – 50 ТэВ посредством измерения доли УФ-излучения в общем количестве черенковского излучения ШАЛ.

Принцип действия наземных черенковских гамма-телескопов



Черенковский гамма-телескоп TAIGA-IACT



Расположен в Тункинской долине (респ. Бурятия)

Работает в составе комплекса астрофизических установок TAIGA

Площадь зеркала ~10 м²

Пороговая энергия наблюдений ~1.5 ТэВ

Предназначен для наблюдения космического гамма-излучения и космических лучей посредством регистрации вспышек черенковского излучения широких атмосферных ливней, вызванных первичными частицами

По данным команды проекта TAIGA, Кузьмичев и др.



Вид кластера из 28 пикселей – ФЭУ ХР1911 (слева).

Кластер, установленный во фронтальную панель камеры (справа).



Фронтальная поверхность камеры, располагаемая в фокальной плоскости телескопа

По данным команды проекта TAIGA, Кузьмичев и др.

Основная цель проекта (РНФ, грант 19-72-20045) – создание и апробация кластера (28 фотоэлементов) на полупроводниковых фотоумножителях (SiPM) для определения дальнейших перспектив полной модернизации камеры (~20 кластеров) телескопа TAIGA-IACT посредством замены вакуумных ФЭУ XP1911 на SiPM OnSemi MicroFJ-60035, которые имеют примерно вдвое большую эффективность детектирования (~50% в максимуме против ~26,5% для XP1911), значительно более низкое энергопотребление и устойчивость к повреждениям в результате чрезмерной засветки.

Дополнительными целями проекта являются исследование возможности применения фильтров ближнего ультрафиолета для снижения уровня шума в камере, возникающего вследствие оптической засветки от ночного неба и увеличение за счет этого длительности рабочего цикла телескопа, а также исследование возможности применения фильтров среднего ультрафиолета для осуществления грубой спектрометрии черенковского излучения ШАЛ, что должно помочь увеличить достоверность определения типа первичной частицы (т.н. гамма-адронной сепарации). Для оценки характеристик телескопа (главным образом – пороговой энергии наблюдений) с модернизированной камерой на SiPM были проведены расчеты средних уровней полезного сигнала Q^{S} [ф.э./пиксель/тайм-фрейм] от событий, вызванных космическими гамма-квантами и протонами космических лучей (КЛ), а также среднего уровня шумового сигнала Q^{N} , вызванного оптическим фоном ночного неба, и его среднеквадратичного отклонения σ^{N} .

Расчеты были проведены с помощью полуаналитической модели формирования и распространения ШАЛ (Kholupenko et al 2018). В рамках этой модели эволюция источников черенковского излучения (высокоэнергетических вторичных электронов и позитронов ШАЛ) описывается с помощью аналитических приближений (Greisen 1956, Ilina et al 1992, Linsley 2001) для средних продольных профилей распределения электронов ШАЛ (то есть, зависимостей количества электронов ШАЛ от высоты), а распространение черенковского излучения ШАЛ – с помощью уравнения переноса излучения, которое решается численно. Для расчета уровня сигнала, генерируемого черенковским излучением в камере телескопа, и шума, генерируемого оптическим фоном ночного неба, используется относительно простая модель телескопа TAIGA-IACT, допускающая аналитическую оценку (решение, выраженное в квадратурах) при известных значениях параметров падающего в телескоп излучения (Kholupenko et al 2020). Тем не менее, она позволяет учесть влияние на величину сигнала всех ключевых узлов и конструкций оптического тракта телескопа: зеркала, фильтров, конусов Уинстона и детекторной камеры.

Расчеты были проведены для различных режимов работы:

- 1) Для работы в основном диапазоне 240 600 нм рассчитаны средние величины полезного сигнала от гамма-квантов Q^{g}_{opt} и протонов Q^{p}_{opt} и шумового сигнала и его среднеквадратичного отклонения $Q^{N}_{opt} \pm \sigma^{N}_{opt}$ (см. Рис. 3)
- 2) Для работы при использовании фильтра ZWB3 (в диапазоне ~260 ~400 нм, см. Рис. 1) рассчитаны величины Q_{ZWB}^{g} , Q_{ZWB}^{p} и $Q_{ZWB}^{N} \pm \sigma_{ZWB}^{N}$ (см. Рис. 3)
- Для работы при использовании модельного фильтра MUV (в диапазоне 260 300 нм, см. Рис. 1) рассчитаны величины Q^g_{MUV}, Q^p_{MUV} и Q^N_{MUV}±σ^N_{MUV} (см. Рис. 4)

В качестве критерия регистрации (т.е. выработки триггера на запись) было выбрано условие

$$Q_F^S \ge Q_F^{th} = Q_F^N + 4\sigma_F^N$$

где индекс S принимает значения "g" или "p", а индекс F – "opt", "ZWB" или "MUV" Это условие позволяет определить значение пороговой энергии наблюдений E_{th} различных первичных частиц при различных режимах работы.



Рис. 1. Зависимости профилей от длины волны λ : 1) типичный спектр черенковского излучения ШАЛ, нормированный на 100% в максимуме [на длине волны 326 nm для гамма-кванта с энегией 1 TeV], N_{Ch} (λ)/N_{Ch} (326 nm) – черная кривая; 2) типичный спектр фона ночного неба по данным Leinert et al (1998), нормированный на 100% на длине волны 600 nm, I_{λ}/I₆₀₀ – красная кривая; 3) эффективность детектирования (photon detection efficiency) SiPM фотоумножителя OnSemi MicroFJ-60035 по данным ONSemi Data Sheet, PDE (λ) – синяя кривая; 4) эффективность детектирования ФЭУ XP1911 (текущая конфигурация камеры телескопа, по данным команды проекта TAIGA) – желтая кривая; 5) коэффициент передачи F(λ) фильтра ZWB3 по данным Guberman et al (2015) – зеленая кривая; 6) коэффициент передачи F(λ) модельного MUV-фильтра 260 – 300 nm – пурпурная кривая.



Рис. 2. Величины, определяющие скорость регистрации фотонов ШАЛ и фотонов фона ночного неба, в зависимости от длины волны λ : 1) профиль типичного спектра черенковского излучения ШАЛ, $N_{Ch}(\lambda)/N_{Ch}(326 \text{ nm})$ – черная штрих-пунктирная кривая; 2) профиль скорости регистрации фотонов ШАЛ с помощью SiPM детектора On Semi MicroFJ-60035, PDE (λ) $N_{Ch}(\lambda)/N_{Ch}(326 \text{ nm})$ – черная штриховая кривая; 3) профиль скорости регистрации фотонов ШАЛ с помощью SiPM детектора OnSemi MicroFJ-60035 при использовании фильтра ZWB3, $F(\lambda)PDE(\lambda)N_{Ch}(\lambda)/N_{Ch}(326 \text{ nm})$ – черная сплошная кривая; 4) профиль типичного спектра фона ночного неба по данным Leinert et al (1998), I_{λ}/I_{600} – красная штрих-пунктирная кривая; 5) профиль скорости регистрации фотонов фона ночного неба с помощью SiPM детектора On Semi MicroFJ-60035, PDE(λ) I_{λ}/I_{600} – красная штриховая кривая; 6) профиль скорости регистрации фотонов фона ночного неба с помощью SiPM детектора On Semi MicroFJ-60035, PDE(λ) I_{λ}/I_{600} – красная штрих-пунктирная кривая; 5) профиль скорости регистрации фотонов фона ночного неба с помощью SiPM детектора On Semi MicroFJ-60035, PDE(λ) I_{λ}/I_{600} – красная штриховая кривая; 6) профиль скорости регистрации фотонов фона ночного неба с помощью SiPM детектора On Semi MicroFJ-60035, PDE(λ) I_{λ}/I_{600} – красная штриховая кривая; 6) профиль скорости регистрации фотонов фона ночного неба с помощью SiPM детектора On Semi MicroFJ-60035, PDE(λ) I_{λ}/I_{600} – красная штриховая кривая; 6) профиль скорости регистрации фотонов фона ночного неба с помощью SiPM детектора On Semi MicroFJ-60035, PDE(λ) I_{λ}/I_{600} – красная штриховая кривая; 6) профиль скорости регистрации фотонов фона ночного неба с помощью SiPM детектора OnSemi MicroFJ-60035 при использовании фильтра ZWB3, $F(\lambda)$ PDE (λ) I_{λ}/I_{600} – красная сплошная кривая.



E, TeVРис. 3. Зависимости среднего полезного и шумового сигналов от энергии первичной частицы: 1) средний полезный сигнал, Q^{g}_{opt} , от событий, вызванных гамма-квантами, при регистрации без фильтра – синяя сплошная кривая; 2) средний полезный сигнал, Q^{p}_{opt} , от событий, вызванных протонами, при регистрации без фильтра – красная сплошная кривая; 3) шумовой сигнал, $Q^{N}_{opt} \pm \sigma^{N}_{opt}$, вызванный фоном ночного неба, при регистрации без фильтра – красная сплошная кривая; 4) пороговое значение $Q^{th}_{opt} = Q^{N}_{opt} + 4\sigma^{N}_{opt}$ для записи сигнала при регистрации без фильтра – черная сплошная кривая; 5) средний полезный сигнал, Q^{g}_{ZWB} , от событий, вызванных гамма-квантами, при регистрации с использованием фильтра ZWB3 – синяя штриховая кривая; 6) средний полезный сигнал, Q^{p}_{ZWB} , от событий, вызванных протонами, при регистрации с использованием фильтра ZWB3 – красная штриховая кривая; 7) шумовой сигнал, $Q^{N}_{ZWB} \pm \sigma^{N}_{ZWB}$, вызванный фоном ночного неба, при регистрации с использованием фильтра ZWB3 – зеленая штриховая кривая; 8) пороговое значение $Q^{th}_{DVB} = Q^{N}_{ZWB} \pm 4\sigma^{N}_{ZWB}$ для записи сигнала при регистрации с использованием фильтра ZWB3 – черная штриховая кривая.

Ввиду малости величины (Q^{N}_{MUV} +4 σ^{N}_{MUV}) пороговая энергия при использовании MUV-фильтра определяется условием достаточного абсолютного количества информации в полезном сигнале Q^{S}_{MUV} >1 ф.э./пиксель/тайм-фрэйм (см. Рис. 4).

Метод гамма-адронной сепарации с использованием УФ-компоненты черенковского излучения ШАЛ основывается на следующем свойстве: при фиксированном значении поверхностной плотности черенковских фотонов ШАЛ в полном исследуемом диапазоне (240 – 600 нм) доля УФ-излучения в диапазоне <300 нм оказывается больше в случае, если первичной частицей ШАЛ является протон, чем в случае, если первичной частицей ШАЛ является протон, чем в случае, если первичной частицей ШАЛ является протон, чем в случае, если первичной частицей ШАЛ является протон, чем в случае, если первичной частицей ШАЛ от связано с тем, что генерация черенковского излучения ШАЛ от протонов в среднем происходит глубже в атмосфере (то есть, на меньших высотах), чем в случае ШАЛ от гамма-квантов. Поэтому черенковские фотоны ШАЛ от протонов проходят меньшую оптическую толщу по поглощению на атмосферном озоне, чем черенковские фотоны ШАЛ от гамма-квантов. При этом следует учитывать, что условие равенства сигналов от гамма-квантов и от протонов в полном исследуемом диапазоне соблюдается при сравнении событий от гамма-квантов с энергией Е^{eff}=(3 – 3.5)Е

Условия применимости этого метода состоят в следующем: 1) абсолютная разность сигналов от гамма-квантов с энергией Е и от протонов с энергией E^{eff} должна быть достаточно велика (более 1 ф.э./пиксель/тайм-фрейм): $\Delta Q_{MUV} = Q_{MUV}^{p}(E^{eff}) - Q_{MUV}^{g}(E) > 1$ ph.e/pixel/time-frame; 2) относительная разность $\Delta Q_{MUV}/Q_{MUV}^{p}(E^{eff})$ также должна быть достаточно велика – не менее 10%. Эти условия определяют диапазон энергий в котором данный метод гамма-адронной сепарации может быть эффективно применен (см. Рис. 5).



Рис. 4. Зависимости среднего полезного и шумового сигналов от энергии первичной частицы, а также пороговое значение для выдачи триггера на запись сигнала при использовании модельного MUV-фильтра 260 – 300 nm: 1) средний полезный сигнал, Q^{g}_{MUV} , от событий, вызванных гамма-квантами – синяя сплошная кривая; 2) средний полезный сигнал, Q^{p}_{MUV} , от событий, вызванных протонами – красная сплошная кривая; 3) средний полезный сигнал, Q^{eff}_{MUV} , от событий, вызванных протонами – красная сплошная кривая; 3) средний полезный сигнал, Q^{eff}_{MUV} , от событий, вызванных протонами – красная сплошная кривая; 3) средний полезный сигнал, Q^{eff}_{MUV} , от событий, вызванных протонами с энергией $E_{eff}=(3 - 3.5)E$ – красная штриховая кривая; 4) шумовой сигнал, $Q^{N}_{MUV}\pm\sigma^{N}_{MUV}$, вызванный фоном ночного неба – зеленая сплошная кривая; 5) пороговое значение $Q^{th}_{MUV}=Q^{N}_{MUV}+4\sigma^{N}_{MUV}$ для записи сигнала – черная сплошная кривая; 6) уровень единичного среднего сигнала 1 ph.e./frame – черная штриховая кривая.



Рис. 5. Разности полезных сигналов от событий, вызванных гамма-квантами с энергией Е и протонами с энергией $E_{eff} = (3 - 3.5)E$ при использовании гипотетического прямоугольного MUV-фильтра 260 – 300 nm: 1) разность абсолютных значений полезных сигналов, ΔQ_{MUV} – синяя сплошная кривая со значениями, отложенными на левой вертикальной оси; 2) единичный уровень 1 ph.e./frame – черная сплошная кривая со значениями, отложенными на левой вертикальной оси; 3) относительная разность значений полезных сигналов, $\Delta Q_{MUV}/Q^{eff}_{MUV}$ – красная сплошная кривая со значениями, отложенными на правой вертикальной оси; 3) относительная разность значений полезных сигналов, $\Delta Q_{MUV}/Q^{eff}_{MUV}$ – красная сплошная кривая со значениями, отложенными на правой вертикальной оси.

Заключение

- 1. Использование в телескопе TAIGA-IACT детекторной камеры, основанной на кремниевых фотоумножителях OnSemi MicroFJ-60035 вместо вакуумных ФЭУ XP1911, позволит примерно в два с половиной раза снизить значение порога регистрации космических гамма-квантов: с ≈1.5 TeV до ≈ 0.6 TeV.
- 2. Последующее применение сплошной маски-фильтра типа ZWB3 позволит еще значительнее снизить этот порог до уровня ≈ 0.3 TeV за счет снижения уровня шума, вызванного в камере телескопа фотонами фона ночного неба, примерно в 5.8 раза (в то время как уровень среднего полезного сигнала понизится примерно в 2.9 раза). Это также позволит существенно увеличить рабочий цикл телескопа за счет наблюдений в лунные ночи и в сумерках.
- 3. Применение узкого MUV-фильтра с полосой пропускания 260 300 nm, маскирующего половину камеры таким образом, что пиксели с фильтром и пиксели без фильтра чередуются в шахматном порядке, может позволить повысить эффективность гамма-адронной сепарации в диапазоне энергий первичных гамма-квантов 24 52 TeV за счет измерения дополнительного параметра доли УФ-излучения в обшем черенковском излучении ШАЛ.

Список литературы

Guberman D. et al (MAGIC Collab.), in Proceedings of the 34th ICRC, 2015, Vol. 34, p. 1237.

Kholupenko E.E. et al, Tech. Phys. 63, 1603 (2018).

Kholupenko E.E. et al, Tech. Phys. 65, 886 (2020).

Kuzmichev L. A. et al., Phys. At. Nucl. 81, 497 (2018).

Greisen K., Progress in Cosmic Ray Physics (North-Holland, Amsterdam, 1956), Vol. 3.

Ilina N. P. et al, Sov. J. Nucl. Phys. 55, 1540 (1992).

Linsley J., in Proceedings of the ICRC, 2001, Vol. 2, p. 502.

Leinert C. et al, Astron. Astrophys. Suppl., No. 1, 1 (1998).

ON Semiconductor, J-Series SiPM Sensors, Silicon Photomultipliers (SiPM), High PDE and Timing Resolution Sensors in a TSV Package. https://www.onsemi.com/pub/Collateral/MICROJ-SERIESD.PDF. Accessed 2017.